

УДК 621.316.9:621.315.1

**В. М. КУТІН** (д-р техн. наук, проф.), **В. М. СТИСКАЛ**  
**Вінницький національний технічний університет**  
styskalvm@ukr.net

## КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРУГОЮ 220-750 кВ

Запропоновано метод неперервного контролю технічного стану екранувального комплексу одягу (ЕКО) в процесі експлуатації. Вибрано оптимальний параметр, що характеризує технічний стан ЕКО в процесі експлуатації. Запропоновано методіку розрахунку напруженості електричного поля в зоні обслуговування електроустановок напругою 220-750 кВ.

**Ключові слова:** електроустановка надвисокої напруги, виконання робіт під напругою, екранувальний комплект одягу, неперервний контроль, стійка опори, протяжний тросовий навіс.

**Постановка проблеми.** Захист від впливу електричного поля в електроустановках напругою 220-750 кВ включає комплекс основних і додаткових захисних заходів. Основні захисні заходи передбачають застосування конструкцій і компоновок, що забезпечують загальне зниження напруженості електричного поля на ВРП; застосування стаціонарних і інвентарних (переносних, знімних, індивідуальних) екранувальних пристроїв, що забезпечують зниження напруженості електричного поля в місцях обслуговування електроустановок; застосування екранувальних комплектів одягу, які є найбільш універсальним і економічним засобом захисту, для індивідуального захисту персоналу від дії електричного поля. В даний час розроблені і промислово випускаються екранувальні комплекти одягу, призначені для робіт під напругою в умовах електричних полів електроустановок напругою до 750 кВ. Разом з тим, відсутні достатньо ефективні методи і засоби оцінювання захисних властивостей ЕКО в процесі їх експлуатації. Існуючі методи оцінювання захисних властивостей ЕКО придатні лише на стадії їх виготовлення, а також для періодичного контролю основних його властивостей перед початком експлуатації. Недостатньо досліджено вплив електричного поля в залежності від конструктивного виконання електрообладнання.

**Метою роботи** є підвищення рівня надійності, безпеки і ефективності експлуатації електроустановок напругою 220-750 кВ шляхом контролю технічного стану та вдосконалення засобів захисту від впливу електричних полів.

В загальному випадку будь-який технічний об'єкт можна розглядати як перетворювач вхідних величин  $x_i$ , які діють на об'єкт або спеціально вводяться в об'єкт, у вихідні  $y_i$ . Це перетворення може бути записано як:

$$y = A \cdot x, \quad (1)$$

де  $x, y$  – відповідно вектори вхідних і вихідних величин;  $A$  – оператор перетворення в технічному об'єкті.

Отже оператор  $A$  і може бути розглянутий в якості діагностичної моделі об'єкту. Умовою роботоздатності об'єкту буде ступінь відповідності дійсного оператора  $A$  заданому  $A_0$ .

Вхідними величинами для екранувального комплексу будуть значення: модуля вектора напруженості електричного поля в даній точці  $|E_0|$ , електричного струму зсуву  $I_0$ , що протікає по тілу людини, і енергії електричного поля  $W_0$ , що поглинається тілом людини без застосування екранувального комплексу, а вихідними – значення модуля вектора напруженості електричного поля в даній точці  $|E_i|$ , струму зсуву  $I_h^k$ , що протікає по тілу людини і енергії електричного поля  $W_h^k$ , що поглинається тілом людини, одягненої в екранувальний комплект. В якості оператора перетворення, що характеризує захисні властивості екранувального комплексу, будуть значення коефіцієнтів екранування по напруженості  $K_E = |E_0|/|E_i|$ , струму  $K_I = I_0/I_h^k$  або енергії електричного поля  $K_W = W_0/W_h^k$ . Отже, математична модель для визначення технічного стану ЕКО в загальному вигляді може бути представлена як:

$$x = f(E_0, I_0, W_0); \quad y = f(E_i, I_h^k, W_h^k); \quad A = f(K_E, K_I, K_W), \quad (2)$$

Замість оператора перетворення  $A = f(K_E, K_I, K_W)$ , що змінюється в межах  $[0,1]$ , в якості діагностичної моделі можна використовувати також його обернену величину, що є функцією ефективності екранування комплексу по напруженості  $E_{\Phi E} = 1/K_E$ , струму  $E_{\Phi I} = 1/K_I$  і енергії  $E_{\Phi W} = 1/K_W$  електричного поля, що змінюється в межах  $[1, \infty]$ , тобто

$$A^{-1} = f(E_{\Phi E}, E_{\Phi I}, E_{\Phi W}). \quad (3)$$

Розрахунок ефективності екранування захисних комплектів одягу (екрану) проводиться з урахуванням теорії електромагнітного поля, що базується на рівняннях Максвелла, використовуючи метод еквівалентування, суть якого полягає в тому, що розрахунок ефективності сітчастого екрану зводиться до розрахунку еквівалентного йому за формою суцільного тонкостінного екрану з використанням наближених граничних умов, які враховують форму, розміри і параметри складових його матеріалів. В якості першої граничної умови для сітки, виготовленої з непаралельних і непрямолінійних провідників, розташованих на неплоскій поверхні, використовуємо складову напруженості електричного поля  $E_t$  на поверхні, дотичній до провідників сітки. В якості другої граничної умови використовується умова безперервності нормальних складових напруженості електричного поля.

В результаті проведених математичних розрахунків отримано вираз для визначення ефективності екранування ЕКО, що є математичною моделлю для визначення технічного стану ЕКО в процесі його експлуатації і показує, що захисні властивості екранувального комплексу залежать не тільки від електричної провідності його матеріалу  $\gamma_E$ , відстані між провідниками сітки  $l$  та їх радіусу  $r_0$ , а також від їх відношення  $l/r_0$ , розмірів по відповідних координатних осях, тієї форми, яку приймає ЕКО в процесі його експлуатації в електричному полі:

$$E_{\Phi 1p} = 1 + \frac{\pi p (1 - N_p) \ln \left( \frac{l}{2\pi r_0} \right)}{l \cdot \ln \left( \frac{l}{r_0} - 1,84 \right)}, \quad (4)$$

де  $N_p$  – коефіцієнт деполяризації еліпсоїда обертання, що еквівалентний по об'єму тілу людини;  $l$  – розмір комірок сітчастого екрану;  $r_0$  – радіус провідників;  $p = a, b, c$  – індекс, що вказує напрям зовнішнього незбуреного електричного поля  $E_0$ . Так індекс  $a$  відповідає компоненті поля  $E_0$  по осі  $x$ ;  $b$  – по осі  $y$ ;  $c$  – по осі  $z$ .

З урахуванням одержаного виразу (4) визначені вихідні параметри діагностичної моделі ЕКО [1]. Так напруженість електричного поля всередині комплексу в загальному вигляді буде визначатися за виразом

$$|E_i| = \sqrt{(k_a E_{0x})^2 + (k_b E_{0y})^2 + (k_c E_{0z})^2}, \quad (5)$$

де  $k_p = 1/E_{\Phi p}$  – коефіцієнт екранування захисного одягу по відповідних осях  $p=a, b, c$ .

Вираз для струму  $I_h^k$ , що протікає по тілу людини, яка одягнена в ЕКО, прийме вигляд

$$I_h^k = \frac{\varepsilon_0 S_{очн} \omega l \ln \left( \frac{l}{r_0} - 1,84 \right) E_0}{p N_p (1 - N_p) \ln \left( \frac{l}{2\pi r_0} \right)}, \quad (6)$$

де  $S_{очн}$  – площа основи еліпсоїда, еквівалентного об'єму тіла людини, на який впливає зовнішнє незбурене електричне поле  $E_0$ ;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота,  $c^{-1}$ ;  $f$  – частота струму, Гц;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

Вираз для енергії, що поглинається тілом людини, одягненої в ЕКО, можна записати як

$$W_h^k = R_h (I_h^k)^2 t, \quad (7)$$

де  $t$  – час знаходження людини в електричному полі;  $R_h$  – опір тіла людини:

$$R_h = \frac{4\rho_h \rho a_h^2}{9P_h}, \quad (8)$$

де  $\rho_h$  – питомий опір тіла людини;  $P_h$  – вага тіла людини;  $\rho$  – об'ємна щільність тіла людини;  $a_h$  – зріст людини.

Таким чином, в результаті теоретичних досліджень показано, що технічний стан ЕКО може бути оцінений шляхом визначення:

– ефективності екранування (коефіцієнта екранування) захисного комплексу, яка може бути отримана шляхом вимірювання параметрів, що характеризують діагностичні стани ЕКО, або знайдена з відношення векторів вхідних і вихідних величин діагностичної моделі ЕКО;

– вихідних параметрів діагностичної моделі екрануючого комплексу: напруженості електричного поля під комплектом, струму, що протікає через тіло людини, одягненої в екрануючий комплект, та енергії електричного поля, що поглинається тілом людини, одягненої в ЕКО, які можуть бути визначені згідно виразів (5), (6), (7), та порівняння отриманих значень з допустимими.

Вибір сукупності показників, що визначають роботоздатність ЕКО в умовах виконання робіт під напругою, проводився на основі аналізу діагностичної моделі екрануючого комплексу та отриманих виразів для її вихідних величин [2].

Найбільш інформативним критерієм для контролю технічного стану ЕКО в процесі їх експлуатації є величина енергії електричного поля, що поглинається тілом людини. Порівняння отриманого значення енергії

електричного поля, що поглинається тілом людини, з еталонними значеннями дозволить робити висновки про роботоздатність ЕКО в процесі його експлуатації.

Оцінювання допустимих значень енергії  $W_{\text{ддоп}}$ , що поглинається тілом людини під дією електричного поля, може бути виконано розрахунковим шляхом з виразу

$$W_{\text{ддоп}} = S_{\text{ддоп}} t_{\text{ддоп}}, \quad (9)$$

де  $S_{\text{ддоп}}$  – допустиме значення потужності електричного поля, що поглинається тілом людини, Вт;  $t_{\text{ддоп}}$  – допустимий час перебування в електричному полі при відповідному рівні потужності, що поглинається тілом людини, год.

Також в роботі вдосконалено метод розрахунку екрануючої дії порталів підстанцій надвисокої напруги та опор ПЛ [3] шляхом використання методу еквівалентних зарядів змінної щільності, що дало можливість враховувати реальні конструкції порталів та опор при розрахунках електричних полів, які створюються електроустановками напругою 220-750 кВ. Дослідження електричного поля поблизу порталів і опор показали, що наявність portalу в полі ошиновки підсилює його в локальній області безпосередньо біля стійки. Вже на відстані порядку 0,5 м від поверхні стійки portalу сумарна напруженість поля не перевищує напруженості зовнішнього електричного поля при відсутності portalу. По мірі віддалення від стійки область посилення поля змінюється областю пониженої, в порівнянні із зовнішньою, напруженості. Впливом опори і portalу при розрахунку електричного поля можна нехтувати на відстанях більших за їх висоти.

На основі використання методу ділянок вдосконалено метод розрахунку електричного поля в розриві протяжного тросового навісу [4]. Проведені розрахунки показали, що напруженість поля в розриві тросового навісу практично співпадає з напруженістю зовнішнього незбуреного електричного поля. Встановлено, що ефективність екранування поблизу краю навісу різко зменшується.

**Висновки.** Запропоновано метод неперервного контролю технічного стану ЕКО в процесі його експлуатації, який базується на визначенні енергії електричного поля, що поглинута тілом оператора, одягненого в ЕКО, з врахуванням дійсних параметрів тіла людини і його положення в процесі виконання робіт, та порівняння отриманих значень з допустимими. Проведено розрахунок екранувальних властивостей порталів і опор та розрахунок електричного поля в місцях розриву протяжних тросових навісів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кутін В.М. Безупинний контроль технічного стану екрануючого комплексу одягу при виконанні ремонтних робіт під напругою в електроустановках напругою 220-750 кВ / В.М. Кутін, В.М. Стискал // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної елект. – 2010. - Частина 3. – С. 65-68.
2. Кутін В. М. Визначення діагностичних параметрів екрануючого комплексу одягу для виконання ремонтних робіт під напругою в електроустановках 220-750 кВ / В.М. Кутін, В.М. Стискал // Технічна електродинаміка. – 2012. – №3. – С. 17-18.
3. Кутін В. М. Метод розрахунку електричного поля в зоні обслуговування електрообладнання підстанцій 220-750 кВ / В.М. Кутін, В.М. Стискал // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1(100) 2012. – С. 120-123.
4. Кутін В. М. Метод розрахунку коефіцієнта екранування електричного поля в місцях розриву тросового навісу для захисту персоналу на підстанціях 220-750 кВ / В.М. Кутін, В. М. Стискал // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3/2010 (62), Ч. 1. – С. 100-103.

#### REFERENCES

1. Kutin V. M., Styskal V. M. The continuous control of the screening complete set of clothes technical state at repair works under tension implementation in 220-750 kV electrical installations. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vypusk. Problemy suchasnoi elektrotekhniki*. 2010: 65-68.
2. Kutin V. M., Styskal V. M. Determination of screening complete set of clothes diagnostic parameters for repair works under tension implementation in 220-750 kV electrical installations. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012; 3: 17-18.
3. Kutin V. M., Styskal V. M. A method of calculation of electric-field in the service area of 220-750 kV substations electrical equipment. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2012; 1(100) 2012: 120-123.
4. Kutin V. M., Styskal V. M. A method of calculation of electric-field screening coefficient in the places of break of rope covers for personnel protection on 220-750 kV substations. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. 2010; 3/2010(62): 100-103.

В. М. КУТИН, В. Н. СТЫСКАЛ

Винницкий национальный технический университет

**Контроль технического состояния средств защиты от влияния электрического поля в электроустановках напряжением 220-750 кВ.** Предложен метод непрерывного контроля технического состояния экранирующего комплекта одежды (ЭКО) в процессе эксплуатации. Выбран оптимальный параметр, который характеризует техническое состояние ЭКО в процессе эксплуатации. Предложена методика расчета напряженности электрического поля в зоне обслуживания электроустановок напряжением 220-750 кВ.

**Ключевые слова:** электроустановка сверхвысокого напряжения, выполнение работ под напряжением, экранирующий комплект одежды, непрерывный контроль, стойка опоры, протяжный тросовый навес.

V. KUTIN, V. STYSKAL

Vinnitsia National Technical University

**Control of the Technical State of Protective Facilities from Electric-Field Influence in 220-750 kV Electrical Installations.** The article describes the increase of reliability and efficiency of protective facilities from electric-field influence at maintenance of 220-750 kV electrical installations due to their perfection and the technical state control in the process of exploitation. The task of increase of 220-750 kV electrical installations service efficiency and reliability decides the same. The improved mathematical model of screening efficiency for determination of the technical state of screening complete set of clothes (SCSC) at implementation of works on potential of wire is offered. Expressions for determination of initial parameters of diagnostic model of SCSC, such as: electric-field strength under a complete set, drain current that flows by the body of the man dressed in a screening complete set, and energy of electric-field, that is absorbed by the body of the man dressed in a screening complete set, are brought. The method of continuous control of the SCSC technical state in the process of exploitation is offered. An optimal parameter that characterizes the SCSC technical state in the process of exploitation is chosen. The algorithm of functioning and experimental sample of device of continuous control of the SCSC technical state in the process of exploitation are worked out. It is based on determination of electric-field energy, that is absorbed by the body of the man dressed in SCSC, and its comparing to the legitimate values. Design procedure of electric-field strength in the service area of 220-750 kV electrical installations is offered. The calculation of shielding properties of portals and transmission towers and calculation of electric-field in the places of break of the prolonged rope covers are conducted. Researches of electric-field near-by portals and transmission towers showed that the presence of portal in the field of lead strengthened it directly at a tower body. In distance of 0,5 m from the surface of tower body of portal total field strength does not exceed external electric-field strength. At a removal from a tower body the area of strengthening of the field changes the area of lower strength. It is possible to scorn influence of transmission tower and portal on distances greater than their heights. The calculations showed that the field strength in the break of rope cover practically coincided with strength of external unindignant electric-field.

**Keywords:** extra-high voltage electrical installations, implementation of works under tension, screening complete set of clothes, continuous control, tower body, prolonged rope cover.